

# Observation de la réflexion temporelle dans un circuit photonique intégré

C. Khallouf<sup>1</sup>, L. Sader<sup>2</sup>, A. Bougaud<sup>2</sup>, B. Little<sup>3</sup>, S. T. Chu<sup>4</sup>, D. J. Moss<sup>5</sup>, R. Morandotti<sup>6</sup>,  
G. P. Agrawal<sup>7</sup>, J. M. Dudley<sup>1</sup>, B. Wetzel<sup>2</sup>, and T. Sylvestre<sup>1,\*</sup>

*1: Institut FEMTO-ST, CNRS, Université Marie et Louis Pasteur, Besançon, France*

*2: XLIM Research Institute, CNRS, Université de Limoges, France*

*3: QXP Technologies Inc., Xi'an, China*

*4: Department of Physics, City University of Hong Kong, Hong Kong, China*

*5: Optical Sciences Centre, Swinburne University of Technology, Hawthorn, Victoria, Australia*

*6: INRS-EMT, 1650 Boulevard Lionel-Boulet, Varennes, J3X 1S2, Québec, Canada*

*7: The Institute of Optics, NY 14627, University of Rochester, USA*

*\*Email: thibaut.sylvestre@univ-fcomte.fr*

## RESUME

Nous mettons en évidence expérimentalement des réflexions temporelles multiples entre deux impulsions laser femtosecondes dans un guide d'ondes intégré en verre de silice dopé. Ce phénomène génère un décalage spectral important et contribue à l'élargissement du spectre total, ainsi qu'à la génération de supercontinuum, en accord avec les simulations numériques et les relations d'accord de phase.

**MOTS-CLEFS :** *Réflexion temporelle; optique non linéaire; circuit photonique intégré*

## 1. INTRODUCTION

Les analogies temporelles des phénomènes de réflexion et de réfraction optique suscitent actuellement un vif intérêt, notamment dans le contexte des fibres optiques [1]. Ces dynamiques décrivent des processus au cours desquels des impulsions courtes se réfléchissent et subissent de forts décalages de fréquence en présence d'une barrière d'indice temporelle, un phénomène étroitement lié au concept d'horizon optique [2].

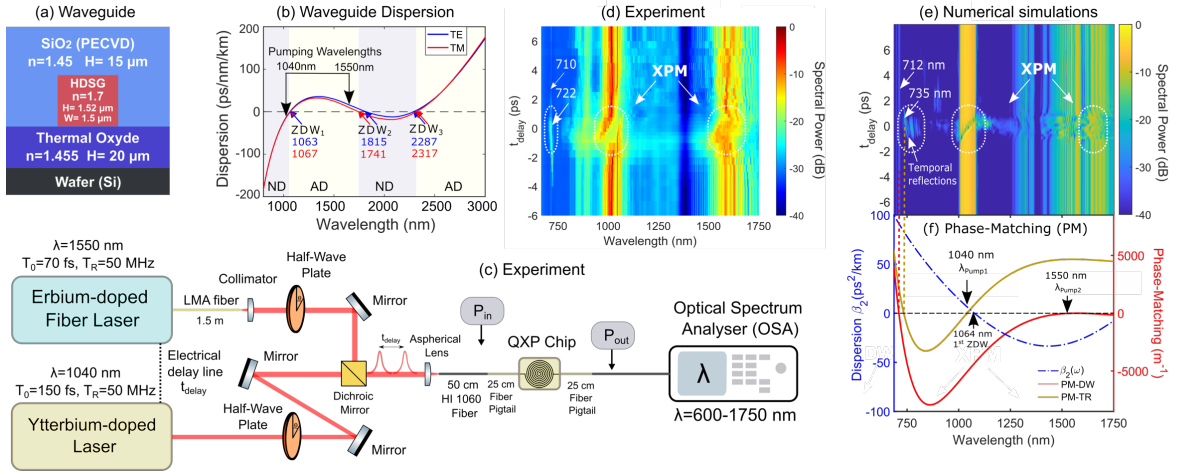
Dans ce travail, nous mettons en évidence expérimentalement et numériquement la présence de réflexions temporelles multiples dans un guide d'ondes intégré en verre de silice dopé à fort indice [3,4]. Ces réflexions sont induites par un pompage à double longueur d'onde, combinant des lasers femtosecondes stabilisés et synchronisés à base d'Ytterbium et d'Erbium, émettant respectivement à 1040 nm et 1550 nm. Nous démontrons ainsi la réflexion temporelle de l'impulsion à 1040 nm lorsqu'elle interagit avec la barrière solitonique formée par l'impulsion à 1550 nm. Ce phénomène entraîne un décalage spectral important, en bon accord avec les simulations numériques et les relations d'accord de phase. De plus, les dynamiques de réflexion temporelle génèrent des composantes supplémentaires de radiations résonantes, contribuant ainsi à l'élargissement du spectre total et à la génération de supercontinuum.

## 2. EXPERIENCE ET RESULTATS

Les figures 1(a) et 1(b) présentent respectivement la section transverse du guide optique intégré utilisé pour observer la réflexion temporelle, ainsi que les profils de dispersion pour les modes TE et TM supportés par le guide. Ce guide d'ondes comprend un cœur en verre de silice fortement dopé (HDSG, indice  $n=1.7$ ), intégré dans de la silice SiO<sub>2</sub> (PECVD) sur un wafer de silicium sur isolant (SOI) [3]. Le cœur mesure  $1,50 \times 1,52 \mu\text{m}^2$ , ce qui permet un fort confinement du champ et un coefficient non linéaire important ( $\gamma=250 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$  à 1550 nm), 125 fois supérieur à celui des fibres optiques standards. Pour faciliter l'injection

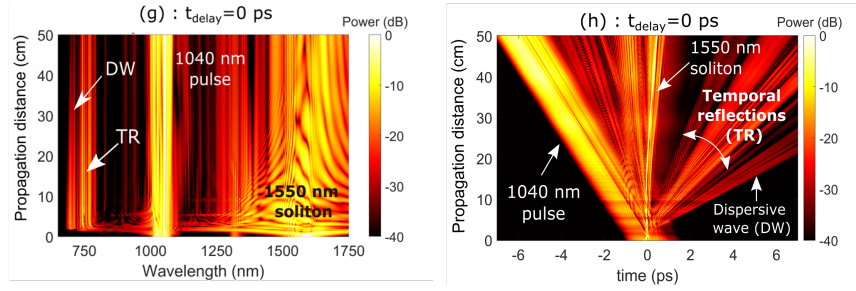
des impulsions laser, la puce est connectée par des cordons de fibres PM aux deux extrémités. Le guide utilisé est une double spirale de 50 cm de long. Les pertes totales ont été mesurées à 8.9 dB à  $\lambda=1550$  nm en utilisant un réflectomètre optique à haute résolution (OBR 4600 Luna Tech), permettant d'estimer les pertes linéiques à 0.1 dB/cm. Les calculs numériques par éléments finis de dispersion des modes TE/TM du guide sont reportés sur la figure 1(b). On peut voir distinctement 4 domaines de dispersion normale (ND) et anormale (AD) avec 3 longueurs d'onde de dispersion nulle. Les conditions de dispersion nécessaires à l'observation de la réflexion temporelle sont réunies lorsque la pompe à 1550 nm se propage en régime solitonique pour créer la barrière d'indice temporelle, tandis que la seconde pompe à 1040 nm évolue en régime de dispersion normale. La figure 1(c) montre un schéma du montage expérimental à double pompage laser dans le guide intégré (QXP chip). Des impulsions femtosecondes à 1040 nm et 1550 nm sont injectées dans le guide d'ondes en spirale de 50 cm de long, avec un délai temporel finement contrôlé entre les deux par voie électronique.

Les figures 1(d) et 1(e) montrent les spectres de sortie expérimentaux et simulés sous forme de carte en fausses couleurs en fonction du retard ( $t_{\text{delay}}$ ) entre les deux impulsions d'entrée. À mesure que ce délai se réduit, l'interaction entre les deux impulsions devient plus forte via la modulation de phase croisée (XPM), entraînant un décalage spectral sur chacune d'elles. Cette interaction génère également des pics localisés dans le spectre, associés à la radiation résonante induite par la réflexion temporelle, observée autour de 722 nm dans les expériences et à 735 nm dans les simulations. Par ailleurs, un pic spectral non localisé apparaît également vers 710 nm. Celui-ci correspond à l'onde dispersive (DW) émise par le soliton à 1550 nm en l'absence de double pompage. Ces observations sont confirmées par les courbes d'accord de phase en figure 1(f).



**Figure 1:** (a) Section transversale du guide d'ondes intégré à haute indice. (b) Dispersion de vitesse de groupe des modes TE et TM. (c) Schéma de l'expérience de double pompage. Spectres expérimentaux (d) et numériques (e) en sortie pour un double pompage à 1040 nm et 1550 nm en fonction du retard ( $t_{\text{delay}}$ ) entre les deux impulsions. (f) Courbe de dispersion (axe de gauche, courbe bleue) et courbes d'accord de phase (axe de droite) pour la radiation résonante : (i) à 735 nm par réflexion temporelle (TR) (courbe jaune) et (ii) à 712 nm par émission d'onde dispersive (DW) par le soliton à 1550 nm à 712 nm (courbe rouge).

La courbe jaune de cette dernière représente le décalage de fréquence induit par la réflexion temporelle, tandis que la courbe rouge correspond à l'onde dispersive (DW) émise par le soliton à 1550 nm sous conditions de pompage unique [4]. Les figures 2(g) et 2(h) ci-dessous illustrent en détail les réflexions temporelles multiples subies par l'impulsion à 1040 nm sur celle à 1550 nm, aussi bien dans le domaine spectral que temporel, tout au long du guide d'ondes.



**Figure 2** (g) et (h) : Simulations numériques: Evolution spectrale (gauche) et temporelle (droite) le long du guide d'ondes montrant les réflexions temporelles de l'impulsion à 1040 nm sur la barrière d'indice du soliton à 1550 nm ainsi que la génération de nouvelles radiations dans le spectre (TR) à 750 nm, pour un retard optique nul à l'entrée du guide ( $t_{\text{delay}}=0$ ).

### 3. CONCLUSION

En conclusion, nous avons étudié et observé l'analogie temporelle de la réflexion optique en faisant interagir deux impulsions laser dans un circuit photonique intégré. Ces résultats apportent un éclairage nouveau sur les mécanismes de réflexion temporelle dans les circuits photoniques intégrés et ouvrent des perspectives prometteuses pour le contrôle dynamique des impulsions ultracourtes et la génération de supercontinuum.

### REFERENCES

- [1] Plansinis et al. "What is the Temporal Analog of Reflection and Refraction of Optical Beams?" *Phys. Rev. Lett.* **115**, 183901 (2015).
- [2] Webb et al. "Nonlinear optics of fibre event horizons," *Nat Commun* **5**, 4969 (2014).
- [3] D. J. Moss et al. "New CMOS-compatible platforms based on silicon nitride and hydex for nonlinear optics," *Nat. Phot.* **7**, 597 (2013).
- [4] C. Khallouf et al. "Supercontinuum generation in high-index doped silica photonic integrated circuits under diverse pumping settings," *Opt. Express*. 545591 (2025).